

УДК 666.1:66.012.2

**В.М. КОШЕЛЬНИК**, д-р техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»;

**Д.В. БЕКНАЗАРЯН**, ассистент НТУ «ХПИ»;

**Е.В. ХАВИН**, канд. техн. наук; м.н.с. НТУ «ХПИ»

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И СРОКА СЛУЖБЫ ОГРАЖДЕНИЯ ВАННОЙ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ**

Для определения периода стойкости огнеупорных материалов варочного бассейна стекловаренных печей разработана методика и составлена программа по расчёту скорости физико-химической коррозии огнеупорного бруса. Выполненные расчёты показали результаты, сопоставимые с данными натурного эксперимента, что позволяет использовать предложенную методику для прогнозирования срока службы стенового бруса варочного бассейна на действующих печах.

Для визначення періоду стійкості вогнетривких матеріалів варильного басейну скловарних печей розроблена методика та складена програма розрахунків швидкості фізико-хімічної корозії вогнетривкого бруса. Виконані розрахунки показали результати, що співпадають з даними натурного експерименту, що дозволяє використовувати запропоновану методику для прогнозування строку служби стінового бруса варильного басейну на працюючих печах.

To determine the period of resistance of glass furnaces digester basin refractory materials the method and the program was devised. The calculations showed results comparable with those of a full-scale investigation that allows using the proposed method for predicting at existing furnaces the life of the glass-melting tank wall beam.

**Введение. Постановка задачи в общем виде.** В настоящее время большое внимание уделяется повышению стойкости огнеупорных брусьев боковых ограждений стекловаренных печей [1–5]. Это связано с необходимостью увеличения кампании печи, уменьшения продолжительности холодных ремонтов, которые ухудшают технико-экономические показатели агрегатов и производства стеклоизделий.

Основным фактором, определяющим длительность кампании стекловаренной печи, является стойкость огнеупорных материалов ограждения варочной зоны, которые подвергаются интенсивному разрушению на уровне зеркала стекломассы в зоне влётов горелок, в районе протока и т.д. (см. рис. 1). Для увеличения срока службы огнеупоров на данных участках рекомендуется ряд мероприятий, однако в большинстве случаев они сводятся к использованию дорогостоящих высокостойких огнеупоров или локальному охлаждению наиболее подверженных разрушению зон огнеупоров.

**Цель исследования** заключается в разработке методики прогнозирования температурного состояния и диагностики срока службы ограждения в безаварийном режиме путём расчёта скорости коррозии огнеупорного бруса по глубине бассейна варочной зоны печи.

**Изложение основного материала.** В связи с тем, что длительность кампании печи для варки листового стекла, с использованием бакоровых брусьев в качестве основного огнеупорного материала ограждения составляет более 1500 суток, полагаем теплофизические свойства стекломассы и огнеупора в течение отдельно взятых суток постоянными. Таким образом, задача по определению необходимых величин может рассматриваться как стационарная.

Объектом исследования выбрана стекловаренная печь с глубиной бассейна 1350 мм, высота зоны пламенного пространства 1200 мм, толщиной бруса 250 мм. Минимальное остаточное значение толщины огнеупорного бруса при котором

заканчивается расчёт принято равным 30 мм. В процессе эксплуатации агрегатов чаще всего применяется воздушное охлаждение огнеупоров на уровне зеркала стекломассы.

Определены теплофизические свойства стенового бруса, изготовленного из огнеупорного материала Бакор-33, свойства стекломассы приняты по данным [6]. При этом температура воздуха, который охлаждает наружную поверхность огнеупорного материала принята 30 °С. Высота зоны обдува огнеупора – 200 мм. Охлаждающая система, в виде цепочки плоских сопел, расположена на уровне зеркала стекломассы. Средний расход воздуха на охлаждение стеновых брусьев в первые тридцать месяцев работы печи составлял 0,9 м<sup>3</sup>/с (интенсивность теплообмена  $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ) на 1 погонный метр, при давлении 800 Па, а затем был увеличен до 1,2 м<sup>3</sup>/с ( $\alpha = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ) [4, 7]. Участки наружной поверхности ограждения, которые не подвержены принудительному обдуву, охлаждаются естественной конвекцией, величина коэффициента теплоотдачи составляет от 25 до 30 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Считаем, что торцы стенового бруса покрыты идеальной тепловой изоляцией (тепловой поток равен нулю), т.е.  $q = 0$ .

Температура газового пространства задана равной 1535 °С. Температуру поверхностного слоя стекломассы задаём равной 1450 °С, перепад температуры по глубине бассейна составляет 400 °С. Толщину пристенного слоя стекломассы, примыкающего к огнеупорному брусу принимаем равной 5 мм.

В рассматриваемом случае коэффициент теплопроводности огнеупорного материала  $\lambda$ , линейно зависит от температуры и имеет вид  $\lambda = \lambda_0(1 + b \cdot t)$  [8]. Характер зависимости коэффициента теплопроводности стекломассы от температуры носит нелинейный характер и представлен на рис. 2а. Ввиду симметричности задачи, рассматривается левая сторона сечения варочного бассейна стекловаренной печи по ходу движения стекломассы, представляющая собой прямоугольник. Принимая во внимание, что высокий уровень температуры продуктов сгорания в пламенном пространстве (1535–1595 °С), конвективной составляющей суммарного коэффициента теплоотдачи пренебрегаем.

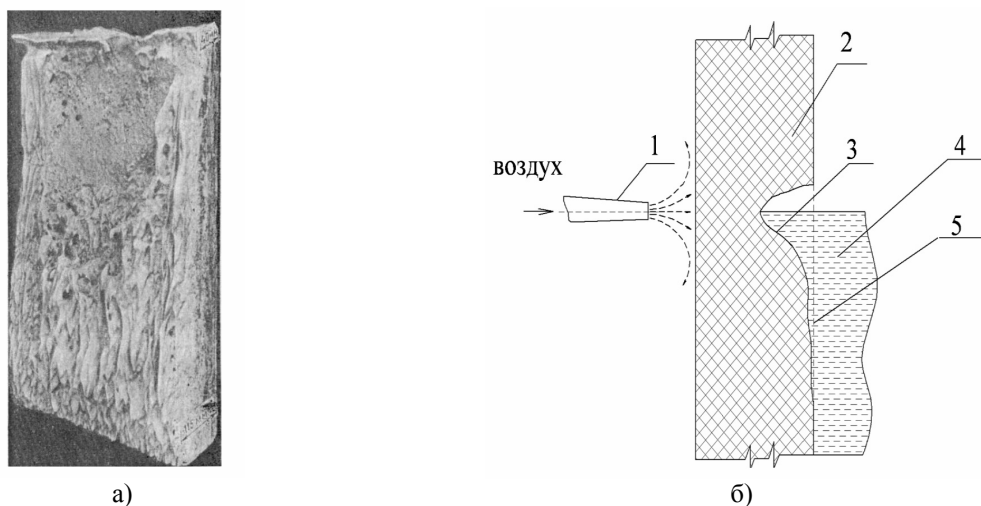


Рис. 1. Стеновой брус ограждения варочной зоны стекловаренной печи:

5 – начальная конфигурация огнеупора; а – общий вид характера разъедания бакорового стенового бруса варочного бассейна; б – расчётная схема фрагмента ограждения варочного бассейна стекловаренной печи с воздушной системой охлаждения: 1 – элемент системы воздушного охлаждения – щелевидное сопло; 2 – огнеупорный брус; 3 – конфигурация коррозии огнеупора; 4 – слой захлажденной стекломассы;

При стационарных условиях передача теплоты от расплава стекломассы к охлаждающей наружную поверхность ограждения среде характеризуется плотностью теплового потока  $q$  и определяется общеизвестным выражением [8], Вт/м<sup>2</sup>

$$q = k \cdot (t_c - t_0), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент передачи тепла, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_c$  – температура расплава стекломассы, контактирующего с огнеупорным брусом, °С;

$t_0$  – температура охлаждающей среды (воздуха), °С.

В свою очередь коэффициент теплопередачи зависит от ряда параметров: термического сопротивления теплопроводности в слое стекломассы и материалах ограждения бассейна печи, термического сопротивления теплоотдачи от наружной поверхности бруса к охлаждающей воздушной среде, Вт/м<sup>2</sup>

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{\delta_c}{\lambda_c}}, \quad (2)$$

где  $\frac{1}{\alpha_0}$  – термическое сопротивление теплоотдаче от наружной поверхности бруса к охлаждающей среде, м<sup>2</sup>·К/Вт;

$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_m}{\lambda_m}$  – термическое суммарное сопротивление теплопроводности слоя материалов ограждения, м<sup>2</sup>·К/Вт;

$\frac{\delta_c}{\lambda_c}$  – термическое сопротивление теплопроводности в заохоложенном слое стекломассы, который контактирует с огнеупорным материалом, (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Скорость коррозии огнеупоров в результате действия расплава стекла является основным критерием выбора материала как по длительности срока службы огнеупоров, так и выявления влияния продуктов его растворения на качество выплавляемого стекла. Основываясь на результатах статических испытаний авторами работы [9] были получены константы скорости поверхностной коррозии и сделан вывод, что важнейшим фактором, определяющим скорость коррозии огнеупора, является температура расплава стекломассы, взаимодействующего с огнеупором.

Константу скорости поверхностной коррозии огнеупоров  $K_y$ , можно определить согласно закону Аррениуса, мм/сут [9]:

$$\ln K_y = A - \frac{B}{T}; \quad (3)$$

$$K_y = e^{A - \frac{B}{T}}, \quad (4)$$

где  $A = 42,0452$ ,  $B = 73008,066$  – коэффициенты кинетических уравнений Аррениуса для огнеупорного материала – Бакора-33;  $T$  – температура ограждения на границе огнеупор-стекломасса, К.

Суточную величину коррозии можно рассчитывалась по уравнению [9], мм

$$\Delta = \sqrt{K_y \cdot \tau} = \sqrt{e^{A - \frac{B}{T}} \cdot \tau}, \quad (5)$$

где  $\tau$  – время взаимодействия со стекломассой, сут.

Коэффициенты, входящие в уравнения (3)–(5), а так же теплофизические свойства стекломассы применимы к расплавам стёкол, имеющих следующий диапазон химического состава основных компонентов стекольной матрицы [6]:  $\text{SiO}_2$  – от 60 до 77 %;  $\text{Na}_2\text{O}$  – от 14 до 16 %;  $\text{CaO}$  – от 6 до 15 %. Следовательно, вышеприведенные коэффициенты могут быть применены для расчёта теплофизических свойств расплавов широкой номенклатуры тарных и листовых стёкол.

На основании разработанной математической модели нами была создана исследовательская программа для расчета скорости коррозии стенового бруса в двумерной постановке, состоящая из следующих блоков:

- исходные данные;
- построение геометрической модели;
- наложение сетки и граничных условий;
- решение – получение температурного поля по толщине огнеупорного бруса;
- расчёт величины коррозии в зависимости от температуры узловых точек на границе «огнеупор-расплав стекломассы»;
- построение новой границы, с учётом коррозии, производится по нормали к конфигурации огнеупора на предыдущем расчётном шаге.

Сформулированная задача решена методом конечных элементов (МКЭ) [10]. Расчетный элемент был получен путем разбиения твердотельной геометрической модели на треугольные элементы с длиной ребра 12,5 мм. Точки пересечения сторон элементов разбиения являются узловыми.

В результате вычислительного эксперимента было получено двумерное распределение температуры по толщине и высоте бруса в зависимости от граничных условий. Далее для всех узловых точек по глубине стекломассы на основании уравнения (5) определялась скорость коррозии огнеупора в зависимости от температуры стенки на границе огнеупор-стекломасса.

Таблица 1

Исходные данные для расчёта

Геометрические параметры*	Значения	Условия теплообмена	Значения
Высота	2550	Температура продуктов сгорания, °C	1535
Толщина	250	Температура воздуха, °C	30
Остаточная толщина огнеупорного бруса на линии зеркала стекломассы в момент останова печи	30	Коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ : – по газовой стороне – по воздушной стороне	147–200 30
Высота зоны обдува	200		
Высота расположения соплового аппарата	1350	Температура стекломассы:	
Толщина охлажденного пристенного слоя расплава стекломассы	5	– на уровне зеркала, °C – на уровне пода, °C	1450 1050

\* в мм.

Коэффициенты кинетических уравнений Аррениуса для различных огнеупоров: Бакор-33  $A = 42,045$ ,  $B = 73008,066$ ; Бакор-41  $A = 47,756$ ,  $B = 84240,076$ .

Свойства огнеупора (Бакор-33): коэффициент теплопроводности  $\lambda = 4,07 + 2,6867 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , плотность  $\rho = 2700 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Свойства расплава тарного стекла: массовая теплоёмкость  $C = 669,2$  Дж/(кг·К); плотность  $\rho = 2590$  кг/м<sup>3</sup>.

В результате вычислений были получены данные о двумерной конфигурации изменения толщины огнеупорного материала ограждения варочного бассейна в процессе эксплуатации стекловаренной печи. Также получены значения температуры стенки в зоне коррозии и коэффициентов теплоотдачи в зоне пламенного пространства.

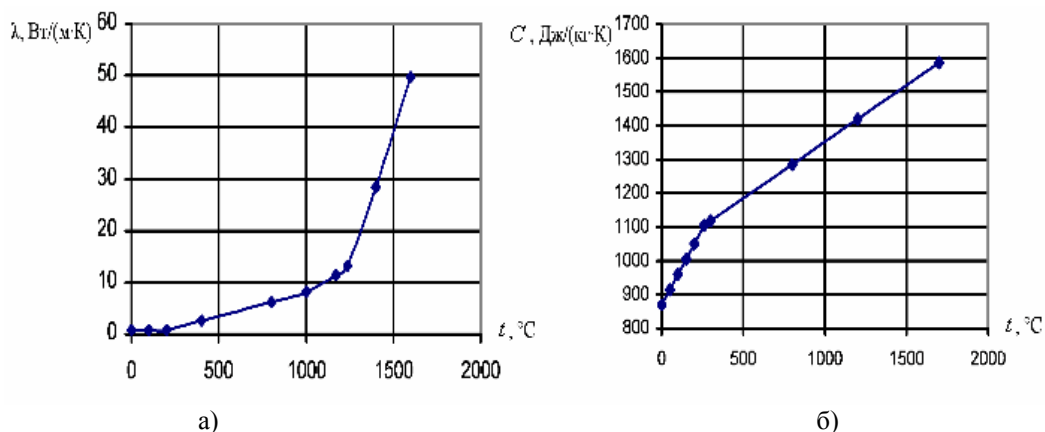


Рис. 2. Теплофизические свойства расплава стекломассы и огнеупорного бруса:  
 а – зависимость коэффициента теплопроводности расплава тарного стекла от температуры;  
 б – зависимость теплоёмкости огнеупорного материала Бакор-33 от температуры

Сравнительный анализ результатов показал (см. табл. 2 и рис. 3), что на заключительном этапе периода кампании печи, день 1467 и 1651, отличие расчётных данных от экспериментальных по остаточной толщине огнеупора составило:

- на уровне зеркала стекломассы 32,57 % (19 мм) и 10,98 % (4,68 мм);
- на глубине 400 мм от зеркала стекломассы 14,49 % (32,79 мм) и 0,41 % (0,772 мм), соответственно.

Таблица 2

Остаточная толщина огнеупорного материала

Расстояние от зеркала стекломассы, мм	Толщина огнеупора, м		Относи- тельная погреш- ность, %	Толщина огнеупора, м		Относи- тельная погреш- ность, %
	Расчёт	Экспе- римент [1]		Расчёт	Экспе- римент [1]	
	День 1467			День 1651		
0	39,33	58,33	32,57	37,96	42,64	10,98
50	93,53	56,55	65,39	91,74	41,67	120,16
100	101,9	68,45	48,87	99,92	53,57	86,52
150	123,83	116,07	6,69	121,26	74,40	62,98
200	136,81	125	9,45	133,80	89,29	49,85
250	149,27	119,05	25,38	145,88	101,19	44,16
300	161,83	179,76	9,97	158,15	148,81	6,28
350	174,57	207,14	15,72	170,76	181,55	5,94
400	193,4	226,19	14,49	189,7	190,48	0,41

Учитывая то, что остаточная толщина огнеупорного бруса бассейна [9], в рассматриваемом сечении составляет от 30 до 42 мм, расхождение данных вычислений и эксперимента (среднего значения) на линии зеркала стекломассы составляет 18,76 %.

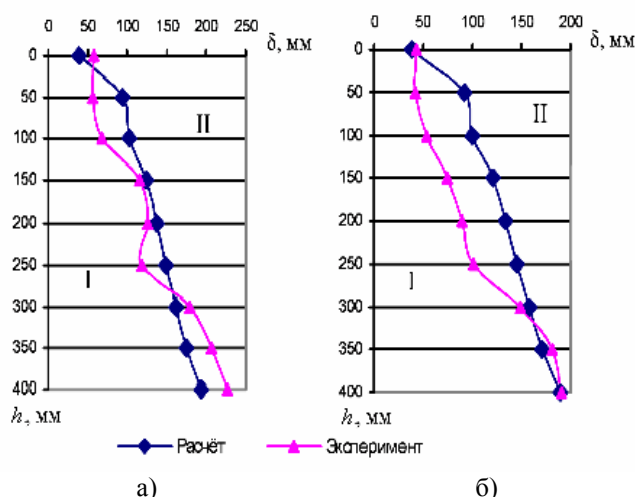


Рис. 3. Толщина огнеупорного материала на протяжении кампании печи на глубинах до 400 мм от зеркала стекломассы: I – огнеупорный брус; II – расплав стекломассы; а – после 1467 дней работы; б – после 1651 дня

**Выводы:** Разработана методика решения задачи коррозионного износа огнеупорного бруса ограждения варочного бассейна стекловаренной печи в расплаве многощелочного тарного стекла в двумерной постановке с учетом зависимости теплофизических свойств огнеупорных материалов от температуры. Определена длительность кампании печи, сопоставимая с данными эксперимента [9]. Выполнен сравнительный анализ конфигурации остаточной толщины огнеупорных материалов по глубине варочного бассейна печи, показавший возможность использования расчётной методики по определению конфигурации огнеупорного материала на заключительных этапах кампании печи на глубинах до 400 мм от зеркала расплава стекломассы. Разработанная методика может быть использована для расчета длительности кампании печи, а также для диагностики состояния огнеупорной кладки варочного бассейна высокопроизводительных стекловаренных печей ванного типа.

**Список литературы:** 1. Козлов, А.С. Теплотехника регенеративных стекловаренных печей [Текст] / А.С. Козлов. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 143 с. 2. Матвеев, Г.М. Энергосбережение при варке стекла [Текст] / Г.М. Матвеев, В.В. Миронов, Э.М. Раскина, К.А. Тарасевич // Стекло и керамика. – 1998. – № 11. – С. 10-11. 3. Волгина, Ю.М. Теплотехническое оборудование стекольных заводов [Текст]: учеб. для техникумов / Ю.М. Волгина. – М.: Стройиздат, 1982. – 276 с. 4. Будов, В.М. Продление межремонтного периода работы стекловаренных печей – резерв увеличения выпуска листового стекла [Текст] / В.М. Будов // Стекло и керамика. – 1975. – № 4. – С. 4-7. 5. Апанина, А.Т. Стойкость огнеупоров при варке стекла С48-3 [Текст] / А.Т. Апанина // Стекло и керамика. – 1984. – № 7. – С. 12-13. 6. Племяніков, М.М. Хімія та теплофізика скла [Текст]: навч. посібник / М.М. Племяніков, О.А. Крупа. – К.: НТУУ «КПІ», 2000. – 560 с. 7. Хавин, Е.В. Закономерности процессов оптимального воздушного охлаждения плавильных реакторов стекловаренного производства [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08; защищена 18.11.2010; утв. 23.02.2011 / Хавин Евгений Валерьевич. – Х.: НТУ «ХПИ», 2010. – 146 с. 8. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст]: учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с. 9. Кучерявый, М.Н. Кинетика коррозии огнеупоров расплавом многощелочного тарного стекла [Текст] / М.Н. Кучерявый // Стекло и керамика. – 1985. – № 3. – С. 22-27. 10. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст] / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

© Кошельник В.М., Бекназарян Д.В., Хавин Е.В., 2012  
Поступила в редколлегию 15.02.12